

# ENSAIO DE TORÇÃO A QUENTE EM AÇO ESTRUTURAL<sup>1</sup>

Mariana Valinhos Barcelos<sup>2</sup>  
Estéfano Aparecido Vieira<sup>3</sup>  
Marcos Antônio Barcelos<sup>4</sup>  
Nilton José Lucinda de Oliveira<sup>5</sup>  
Marcelo Lucas Pereira Machado<sup>3</sup>

## Resumo

As mudanças no comportamento de amaciamento que ocorrem durante a deformação a quente de um aço está diretamente ligada a parâmetros como deformação, taxa de deformação, temperatura, tempo de espera entre passes e taxa de resfriamento. Um aço estrutural foi estudado por meio de simulação através de ensaio de torção a quente. Os corpos de prova para os ensaios de torção foram usinados a partir de esboços do aço retirados após a laminação de desbaste. Foi realizado um ensaio de torção com múltiplas deformações em resfriamento contínuo no laboratório de conformação mecânica do CETEC, em Belo Horizonte-MG com o objetivo de obter as temperaturas críticas (T<sub>nr</sub>, Ar<sub>3</sub> e Ar<sub>1</sub>). Através da comparação do resultado do ensaio com o cálculo das mesmas temperaturas utilizando equações disponíveis na literatura foi verificado uma variação de 1,8%.

**Palavras chaves:** Ensaio de torção a quente; Aço estrutural; Curvas de escoamento plástico.

## HOT TORSION TEST IN STRUCTURAL STEEL

### Abstract

The softening behavior changes that occur during hot deformation of steel is directly related to processing parameters such as strain, strain rate, temperature, interpass time and cooling rate. A structural steel was analyzed by hot rolling simulation using hot torsion test. The specimens of torsion were machined from workpiece after roughing mill. Multiple strains in continuous cooling torsion tests were performed in hot deformation laboratory of CETEC, in Belo Horizonte-MG. The critical temperatures (T<sub>nr</sub>, Ar<sub>3</sub> and Ar<sub>1</sub>) were calculated by equations available in literature and compared to values obtained by the test (the variation did not exceed 1.8%).

**Key words:** Torsion test; Structural steel; Flow curves.

<sup>1</sup> Contribuição técnica ao 48º Seminário de Laminação – Processos e Produtos Laminados e Revestidos, 24 a 27 de outubro de 2011, Santos, SP.

<sup>2</sup> Estudante do curso de mestrado acadêmico do programa de pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais do IFES.

<sup>3</sup> Professor Doutor do curso de mestrado acadêmico do programa de pós-graduação em Engenharia Metalúrgica e de Materiais do IFES.

<sup>4</sup> Engenheiro Metalurgista (ArcelorMittal Tubarão).

<sup>5</sup> Mestre em Engenharia Metalúrgica (CETEC).

## 1 INTRODUÇÃO

O mercado da indústria siderúrgica é bastante competitivo. Para melhorar a competitividade, pesquisas dos processos de fabricação e conformação mecânica dos aços são essenciais para otimizar a produtividade e melhorar as propriedades do material produzido, reduzindo principalmente os custos.<sup>(1,2)</sup>

Um método eficiente que apresenta baixo custo é a utilização de ensaio de torção a quente, que consiste em uma técnica experimental capaz de reproduzir as condições de trabalho durante a conformação, sendo possível simular todo o processo de laminação a quente. Isso permite também investigar os mecanismos que estão operando, através de curvas de escoamento plástico e do acompanhamento da evolução microestrutural.<sup>(3,4)</sup>

O ensaio de torção realizado a altas temperaturas tem grande importância para área de estudo da metalurgia, pois pelo fato do corpo de prova não estar sujeito ao empescoamento como na tração, torna-se possível levar o ensaio até grandes deformações antes que a amostra seja rompida. Neste caso, com somente um ensaio é possível simular o processo de conformação a quente, obtendo-se, por exemplo, a microestrutura final que só seria obtida por uma planta de laminação piloto.<sup>(5,6)</sup> A modelagem das curvas tensão *versus* deformação é essencial para melhorar o processo de conformação dos metais quando produzidos a altas temperaturas.<sup>(7)</sup>

Nestes ensaios, pode-se controlar a temperatura, a deformação aplicada, a taxa de deformação e o tempo entre os passes. Assim é possível se reproduzir os processos de pré-aquecimento, esquemas de deformação e taxas de resfriamento próximas às do processamento de laminação industrial.<sup>(8)</sup>

Através da leitura do torque e do ângulo dados pela máquina de torção, torna-se possível calcular a tensão equivalente e a deformação equivalente. A tensão equivalente varia ao longo do raio da amostra e na superfície pode ser calculada através da Equação 1:<sup>(9)</sup>

$$\sigma_{eq} = \frac{\sqrt{3} \cdot \tau \cdot (3 + m + n)}{2\pi r^3} \quad (1)$$

Onde  $\tau$  e  $r$  são respectivamente, o torque e o raio da amostra.<sup>(9)</sup> O valor de  $m$  e  $n$  embora variem com a deformação, de maneira simplificada podem assumir os valores de 0,17 e 0,13 respectivamente.<sup>(9)</sup> A deformação equivalente é calculada a partir do ângulo de rotação medido:<sup>(9)</sup>

$$\epsilon_{eq} = \frac{r \cdot \theta}{\sqrt{3} \cdot L} \quad (2)$$

Onde,  $\theta$ ,  $r$  e  $L$  são respectivamente, ângulo de torção, o raio e o comprimento da amostra.

Os ensaios de torção a quente podem ser realizados em diferentes ciclos. Neste estudo foi realizado um ensaio com múltiplas deformações em resfriamento contínuo com o objetivo de obter as temperaturas críticas ( $T_{nr}$ ,  $Ar3$  e  $Ar1$ ).

## 2 MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Materiais

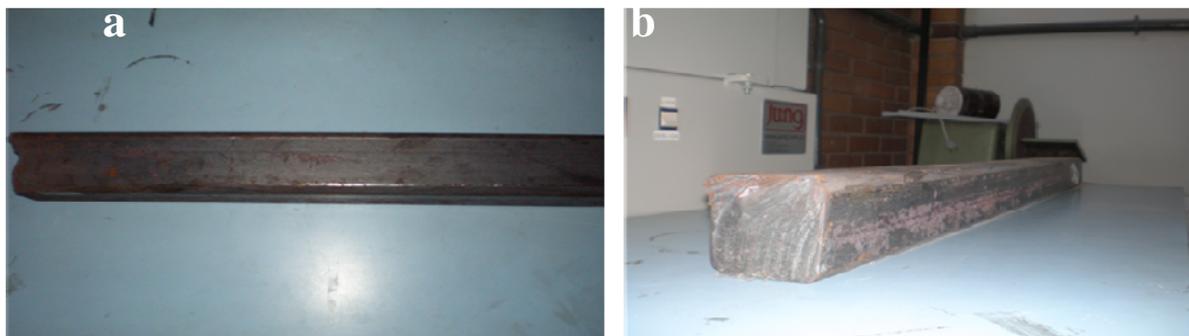
Para realização da parte experimental utilizou-se um aço estrutural conforme faixa de composição da Tabela 1. Este aço foi cedido pela ArcelorMittal Cariacica após a laminação de desbaste, onde o tarugo com 130 mm x 130 mm é laminado em cinco passes dando origem a um esboço de aproximadamente 76 mm x 76 mm.

**Tabela 1.** Faixa de Composição química do aço estrutural

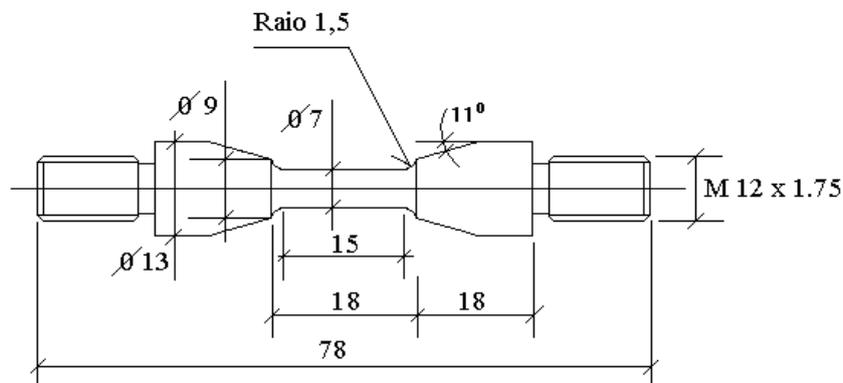
Faixa	C	Mn	Si	P	S	Cu	Cr	Ni	Sn	Mo	Nb
Min	0,10	0,60	0,15								0,02
Máx	0,16	1,10	0,35	0,04	0,05	0,25*	0,20*	0,25*	0,07*	0,05*	0,04

\*Devido o processo de fabricação do aço ser via forno elétrico é realizado o controle do percentual máximo de elementos residuais pela indústria.

Os corpos de prova foram usinados a partir do esboço de 76 mm x 76 mm, após a realização da laminação de desbaste (Figura 1). As dimensões úteis do corpo de prova correspondem às medidas de 15 mm de comprimento por 7 mm de diâmetro como detalhado na Figura 2 .



**Figura 1.** Fotografia do esboço antes da usinagem. (a) Vista superior; e (b) vista frontal.

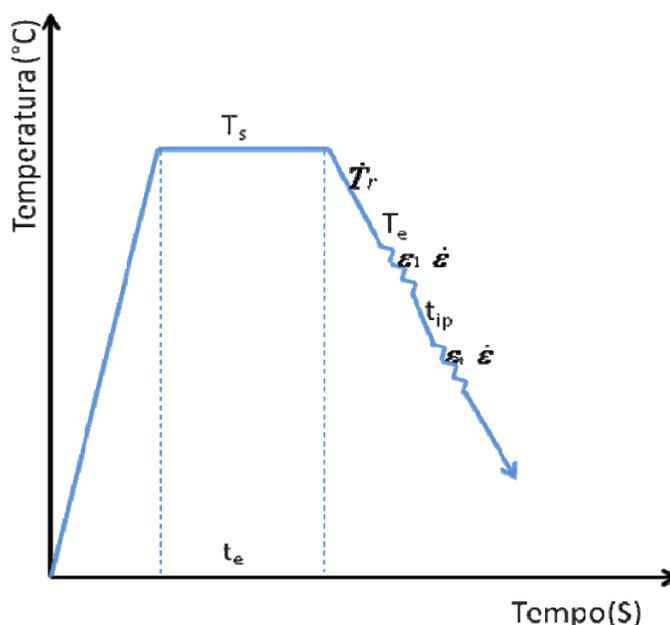


**Figura 2.** Corpo de prova para ensaio de torção à quente. Medidas em milímetros.<sup>(2)</sup>

## 2.2 Métodos

### 2.2.1 Ensaio com múltiplas deformações em resfriamento contínuo

Estes ensaios geram curvas que permitem a determinação das temperaturas críticas de processamento do material, sendo elas:  $T_{nr}$ ,  $Ar_3$  e  $Ar_1$ . No ensaio realizado neste trabalho foi usada uma metodologia semelhante à desenvolvida em diversos trabalhos.<sup>(2,3,10)</sup> Os corpos de prova foram aquecidos até a temperatura  $1.200^{\circ}C$  a uma taxa média de aquecimento de  $2^{\circ}C/s$  e mantidos nesta temperatura por 2 min., tempo necessário para a completa homogeneização da temperatura no corpo de prova. Em seguida foram resfriados a uma taxa de  $1^{\circ}C/s$ , aplicando-se passes com deformação de 0,2 cada, sendo a primeira deformação a  $1.170^{\circ}C$  e as demais em intervalos de  $30^{\circ}C$  até  $660^{\circ}C$ . Na Figura 3 é possível observar esquematicamente o ciclo térmico o ciclo térmico utilizado.



**Figura 3.** Esquema indicando os ensaios com múltiplas deformações em resfriamento contínuo. Onde  $T_s$  é a temperatura de solubilização,  $\dot{T}_r$  a taxa de resfriamento,  $\dot{\epsilon}$  a taxa de deformação,  $\epsilon$  a deformação,  $T_e$  a temperatura do ensaio e  $T_{ip}$  o tempo entre passes.

Para determinar as temperaturas críticas de processamento do material,  $T_{nr}$ ,  $Ar_3$  e  $Ar_1$ . Os ciclos utilizados seguiram as etapas discriminadas na Tabela 2. O ensaio foi realizado no Laboratório de conformação mecânica da Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais (CETEC).

**Tabela 2.** Ciclo térmico aplica no ensaio com múltiplas deformações em resfriamento contínuo no CETEC<sup>(2)</sup>

Passo	Temperatura (°C)	Deformação acumulada	tip (s)
1	1170	0,2	30
2	1140	0,4	30
3	1110	0,6	30
4	1080	0,8	30
5	1050	1,0	30
6	1020	1,2	30
7	990	1,4	30
8	960	1,6	30
9	930	1,8	30
10	900	2,0	30
11	870	2,2	30
12	840	2,4	30
13	810	2,6	30
14	780	2,8	30
15	750	3,0	30
16	720	3,2	30
17	690	3,4	30
18	660	3,6	30

### 2.2.2 Cálculo das temperaturas críticas

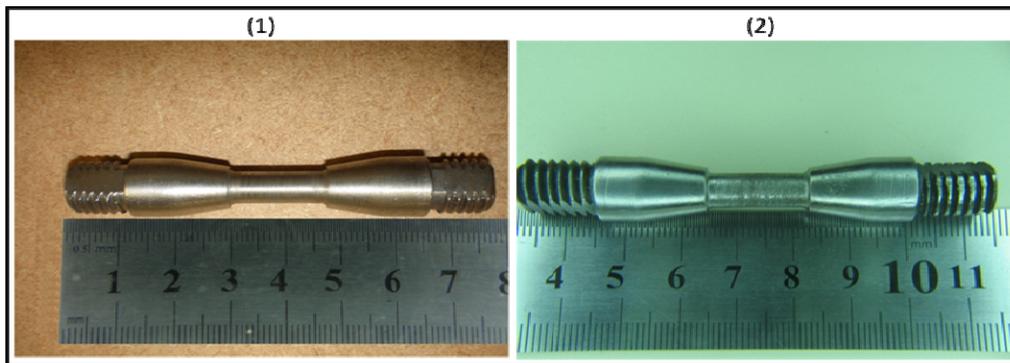
Utilizando as Equações 3 e 4,<sup>(5)</sup> calculou-se as temperaturas críticas  $T_{nr}$  e  $Ar_3$  e foi feita a comparação com os valores obtidos pelo ensaio com múltiplas deformações em resfriamento contínuo.

$$T_{nr} = 897 + 464.C + (6445.Nb - 644\sqrt{Nb}) + (732.V - 230.\sqrt{V}) + 890.Ti + 363.Al - 357.Si \quad (3)$$

$$Ar_3 = 910 - 310.C - 80.Mn - 20.Cu - 15.Cr - 55.Ni - 80.Mo + 0,35(t - 8) \quad (4)$$

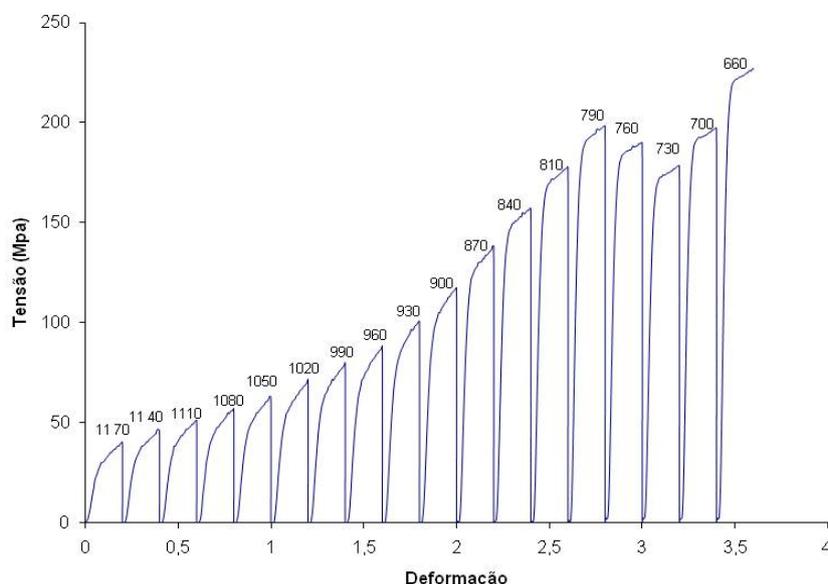
## 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após o ensaio, conforme mostra a Figura 4 é possível observar que o material apresentou deformação homogênea por toda a região útil do corpo de prova após os ciclos de deformações aplicados.



**Figura 4.** Fotografia mostrando a região útil do corpo de prova (1) sem deformação e (2) após a deformação.

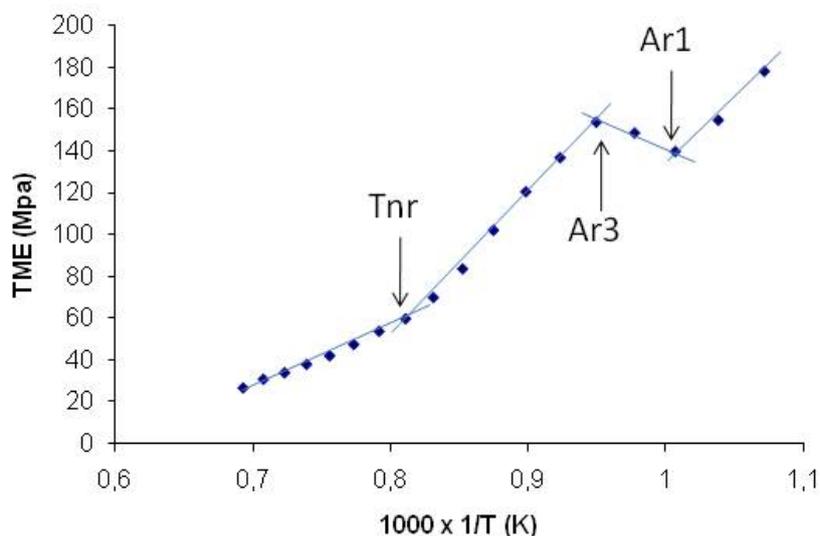
A Figura 5 apresenta os resultados das curvas tensão versus deformação obtida durante o ensaio. É possível observar a variação da tensão em relação à mudança de temperatura na qual é aplicada a deformação. Nota-se que a tensão aumenta com a diminuição da temperatura, evidenciando a região austenítica e que a partir de temperaturas menores do que 960°C há um aumento mais acentuado no crescimento da tensão. Isto caracteriza uma mudança de região de recristalização para região de encruamento, ou seja, a T<sub>nr</sub>. Posteriormente, com a diminuição da temperatura, a queda da tensão evidencia o aparecimento da ferrita, que é o início da região intercrítica ( $\gamma+\alpha$ ) ou Ar<sub>3</sub> do diagrama Fe<sub>3</sub>C. Finalmente, o aumento da tensão novamente com a diminuição da temperatura evidencia o aparecimento da cementita, que é o início da região ferrítica-cementita ou Ar<sub>1</sub>.



**Figura 5.** Curvas tensão versus deformação gerada através do ensaio com múltiplas deformações.

Na Figura 6 está apresentado o gráfico da tensão média equivalente versus  $1.000/T$ . Através da análise da curva desta figura é possível determinar mais precisamente os valores de T<sub>nr</sub>, Ar<sub>1</sub> e Ar<sub>3</sub>. Estes dados são mostrados na Tabela 3, onde pode ser

comparado com os valores obtidos através da utilização das Equações 3 e 4 para T<sub>nr</sub> e Ar<sub>3</sub>, respectivamente.



**Figura 6.** Gráfico da tensão média equivalente versus  $1000 \times 1/T$ , mostrando as regiões de T<sub>nr</sub>, Ar<sub>3</sub> e Ar<sub>1</sub> para o aço estrutural.

**Tabela 3.** Valores de T<sub>nr</sub>, Ar<sub>3</sub> e Ar<sub>1</sub> encontrado no ensaio e calculado utilizando as Equações 3 e 4

	T <sub>nr</sub>	Ar <sub>3</sub>	Ar <sub>1</sub>
Ensaio	960	780	720
Calculado	942	790*	-

\* Foi desconsiderado o último termo da equação no cálculo, pois o material estudado não se trata de uma placa.

Observa-se que a variação entre o valor obtido pelo ensaio e o valor calculado são pequenas, ou seja, aproximadamente 1,8% para T<sub>nr</sub> e 1,3% para Ar<sub>3</sub>.

No estudo realizado por Reis,<sup>(11)</sup> foi utilizado um aço estrutural com composição química semelhante ao utilizado neste trabalho. Os valores calculados por Reis<sup>(11)</sup> para T<sub>nr</sub> e Ar<sub>3</sub> foram 961°C e 776°C respectivamente, mostrando similaridade aos valores obtidos através deste ensaio.

## 4 CONCLUSÃO

Com o ensaio contínuo com múltiplas deformações realizado com a máquina de torção do CETEC é possível mostrar as regiões de recristalização, encruamento e mudanças de fase dos aços.

As temperaturas críticas, T<sub>nr</sub>, Ar<sub>3</sub> e Ar<sub>1</sub> obtidas pelo ensaio de torção em resfriamento contínuo com múltiplas deformações, para o aço estrutural analisado, são bem próximas das calculadas utilizando as equações disponíveis na literatura.

## REFERÊNCIAS

- 1 GEITTENS, A. R. **Análise do comportamento mecânico de um aço carbono processado na região intercrítica**. São Paulo: UFSCAR, 2001.
- 2 SILVA, F. H. A. **Avaliação do amaciamento em aço inoxidável ferrítico por ensaio de torção a quente**. Ouro Preto: UFOP, 2008.
- 3 JORGE Jr, A. M.; BALANCIN, O. Ensaio de torção: Um método para o estudo da trabalhabilidade a quente dos materiais metálicos. **REM**, Ouro Preto, v. 46, n. 1/3, p. 128-135, jan-set 1993.
- 4 REGONE, W. **Simulação da laminação a quente de um aço livre de intersticiais (IF) através de ensaio de torção**. São Paulo: UFSCAR, 2001.
- 5 BARBOSA, R. A. N. M.; BORATTO, F. J. M.; SANTOS, D. B. **Fundamentos da laminação controlada**. Belo Horizonte: UFMG, 1989. cap.1, 2, 8 e 9, p.1-302.
- 6 DIETER, E. G., **Metalurgia Mecânica**. 2. Ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan S.A, 1981. cap.10, p.322-331.
- 7 JORGE Jr, A. M.; BALANCIN, O.; REGONE, W. Effects of competing hardening and softening mechanics on the flow stress curve modeling of ultra-low carbon steel at high temperature. **Jornal of Materials Processing Technology**, v.142, 415-421, mar. 2003.
- 8 BORATO, F.; YUE, S.; JONAS, J.J.; LAWRENCE, T. Projeto de esquemas de laminação controlada através de ensaio de torção computadorizado. **COLAM-ABM**, São Paulo, Brasil, 1987.
- 9 SICILIANO Jr, F. **Mathematical modeling of the hot strip Rolling of Nb microalloyed steels**. Montreal, Canada: Ph.D Thesis, McGill University, 1999.
- 10 BORATTO, F.; YUE, S.; JONAS, J. J.; LAWRENCE, T. Projeto de esquemas de laminação controlada através de ensaio de torção computadorizado. **COLAM-ABM**, São Paulo, p.65-81, 1987.
- 11 REIS, E. G. **Modelo matemático para previsão das propriedades mecânicas na laminação a quente de perfis estruturais**. Belo Horizonte: UFMG, 2007.